

ВЫБОР МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

Калий В.А.¹, Белов С.А.¹, Резниченко А.В.¹

¹Открытое акционерное общество Промышленная группа «Новик» (ОАО ПГ «Новик»), Москва, Россия (123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1), e-mail: mail@pg-novik.ru

При разработке перспективных газотурбинных установок одной из главных проблем является создание камер сгорания с начальной высокой температурой газов в зоне горения. Методы проектирования камер сгорания основываются на формализованных представлениях о рабочем процессе, протекающем в камерах сгорания, при этом все методы используют теоретические положения, разработанные в связи с изучением отдельных физических явлений, из которых складывается рабочий процесс. Расчет строится в основном на обычных уравнениях газовой динамики с использованием некоторых зависимостей и коэффициентов, полученных опытным путем. Приведены проектировочные расчеты высокотемпературных кольцевых камер сгорания в первом приближении. Отмечено, что при проектировании кольцевых камер сгорания, помимо получения геометрических и стехиометрических характеристик объекта, в обязательном порядке необходимо производить оценку вредных выбросов согласно требованиям государственных и международных стандартов.

Ключевые слова: камера сгорания, проектировочный расчет, турбина, увеличение температуры, удельная мощность, ГТУ.

SELECTION OF DESIGN TECHNIQUES AND THEORETICAL CALCULATIONS OF HIGH-TEMPERATURE COMBUSTIONS

Kaliy V.A.¹, Belov S.A.¹, Reznichenko A.V.¹

¹Joint-stock company industrial group "Novik" (JSC "Novik"), Moscow, Russia (123182, Russia, Moscow, Akademika Kurchatova pl.,1), e-mail: mail@pg-novik.ru

It is One of the major problems during elaboration of the advanced gas turbine plants is making combustors with high setting gas temperature in combustion zone. Design techniques of combustors are based on formal conceptualization of the working process in combustors. All these techniques use theoretical conditions designed due to the examination of separate physical phenomena which form working process. Essentially calculation is based on common formulas of gas dynamics using laws and coefficients achieved by experiments. Authors adduce projecting calculations of high-temperature annular combustion chambers in first approximation. They also point out that it is essential to evaluate hazardous emissions according to state and international standards during projecting of annular combustion chambers. It is also of high importance to obtain geometrical and stoichiometrical adjectives of the object.

Keywords: combustor, projecting calculation, turbine, temperature increase, specific power, gas turbine plant.

Камерой сгорания ГТУ называется устройство, обеспечивающее повышение запаса тепловой энергии рабочего тела за счет химической реакции окисления топлива. Камера сгорания представляет собой некий частично ограниченный объем, в который непрерывно поступает топливо и окислитель и отводятся продукты сгорания.

Наибольшее распространение в ГТД получили три схемы камер сгорания (КС) - трубчатые, трубчато-кольцевые и кольцевые. В трубчатой КС каждая жаровая труба имеет отдельный корпус и образует индивидуальную трубчатую КС.

Трубчато-кольцевая КС также состоит из нескольких отдельных жаровых труб и газосборников, но располагаются они в общем кольцевом канале между корпусами.

В кольцевой КС между образующими кольцевой канал наружным и внутренним корпусами устанавливается одна жаровая труба. Рабочий объем жаровой трубы представляет собой кольцевое пространство между наружной и внутренней стенками и фронтальной плитой.

Кроме рассмотренных основных схем, существует большое количество КС, которые имеют особенности конструкции для удовлетворения требований, предъявляемых к конкретной КС. Так, по конструкции фронтальных устройств жаровых труб различают КС испарительные и многофорсуночные.

Выбор конструкции схемы КС зависит от назначения двигателя и от предъявляемых к нему специальных требований. Спроектированные для одного и того же двигателя трубчато-кольцевая и кольцевая КС имеют практически одинаковые характеристики, хотя каждая схема имеет свои индивидуальные достоинства и недостатки.

В промышленных газотурбинных установках (ГТУ) широкое применение находят трубчато-кольцевые КС, поскольку в данном случае одно из первых мест занимает требование по эксплуатационной технологичности.

Однако объем жаровой трубы определяет время пребывания продуктов сгорания, что у высокотемпературных КС влияет на выбросы вредных веществ. Поэтому для уменьшения выбросов NO_x необходимо уменьшать время пребывания продуктов сгорания в номинальном режиме, т.е. уменьшать объем жаровой трубы. Исходя из данных предположений, можно сделать вывод о том, что для высокотемпературных КС наиболее предпочтительной является кольцевая конструкция камеры сгорания.

Теоретический расчет кольцевой камеры сгорания достаточно подробно изложен в специализированной литературе [1-5]. При разработке камеры сгорания с высокой температурой в зоне горения ($1700\text{ }^\circ\text{C}$) необходимо применять классический алгоритм, который послужил основой для создания методики расчета кольцевых камер сгорания.

Согласно данному алгоритму, по заданным исходным данным, а именно – расхода воздуха через газовый тракт, степени повышения давления и так далее, а также конструктивным размерам последней ступени компрессора и газовой турбины определяются теплоемкости воздуха и газа, а также уточняется периферийный диаметр компрессора для обеспечения непрерывности потока.

Далее производится расчет диффузора, объемный расход воздуха в диффузоре, площадь сечения на входе в диффузор, его длина и потери давления. На этом же этапе определяется расстояние до плоскости плиты фронтального устройства.

Следующий этап проектирования – расчет фронтального устройства. На этом этапе определяются диаметр фронтальной плиты, число горелок, количество ярусов горелок и размеры горелок, а также шаг их установки.

Затем рассчитывается жаровая труба путем определения ее необходимого объема и длины зоны горения. Здесь же производится расчет газосборника, распределение воздуха, предназначенного для горения и охлаждения элементов КС, а также определяется количество и размеры охлаждающих отверстий. По результатам расчета определяется длина КС и основные геометрические размеры характерных зон и сечений.

На заключительном этапе производится гидравлический расчет камеры сгорания, в результате которого определяются потери давления и коэффициент восстановления полного давления.

Результаты проектировочного расчета трех вариантов камер сгорания по изложенной выше методике для температуры в зоне горения не менее 1700 °С приведены в таблице 1, а геометрические контуры – на рисунке 1.

Таблица 1 – Теоретические параметры расчетных КС

Параметр	Значения		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Исходные данные	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	2	3	4
Расход воздуха через зону горения, кг/с	20	20	54,6
Расход топлива, кг/с	0,676	0,634	1,839
Степень сжатия компрессора	25	35	26
Полный коэффициент избытка воздуха	4,8	5,2	4,87
Коэффициент избытка воздуха через зону горения	1,72	1,835	1,726
Диаметр втулки последней ступени компрессора ВД, м	0,48	0,48	0,608
Периферийный диаметр последней ступени компрессора ВД, м	0,5	0,5	0,637
Диаметр втулки соплового аппарата турбины ВД, м	0,582	0,582	0,752
Периферийный диаметр сечения соплового аппарата турбины ВД, м	0,662	0,662	0,845
Результаты проектировочного расчета			
Средний диаметр компрессора, м	0,49	0,49	0,623
Средний диаметр турбины, м	0,622	0,622	0,798
Высота канала на входе в диффузор, м	0,01	0,01	0,015
Площадь входа в диффузор, м ²	0,015	0,015	0,028
Объемный расход воздуха, м ³ /с	1,998	1,427	5,244

Скорость воздуха на входе в диффузор, м/с	129,77	92,69	184,92
Длина диффузора, м	0,081	0,102	0,062
Гидравлические потери в диффузоре, МПа	74590	37640	76600
Расстояние от выходного сечения диффузора до плоскости плиты фронтального устройства, м	0,26	0,407	0,104
Средний диаметр фронтальной плиты	0,565	0,602	0,659
Высота фронтальной плиты, м	0,058	0,052	0,081
Диаметр горелки, м	0,017	0,015	0,023
Число горелок	88	105	76
Диаметр внешнего яруса, м	0,594	0,628	0,698
Диаметр внутреннего яруса, м	0,537	0,576	0,621
Расстояние между ярусами горелок, м	0,029	0,026	0,038
Шаг горелок верхнего яруса, м	0,042	0,038	0,058
Шаг горелок внутреннего яруса, м	0,038	0,034	0,051
Объем жаровой трубы, м ³	0,012	0,00774	0,03
Высота жаровой трубы, м	0,077	0,06	0,114
Расстояние от фронтальной плиты до сечения ЖТ, имеющ. максимальную высоту, м	0,038	0,03	0,057
Длина зоны горения жаровой трубы, м	0,103	0,081	0,154
Температура в зоне горения, °С	1703	1706	1694
Относительный расход воздуха для охлаждения турбины	0,2	0,2	0,17
Относительный расход воздуха для охлаждения газосборника	0,181	0,18	0,185
Относительный расход воздуха в зоне горения	0,208	0,192	0,205
Относительный расход воздуха в зоне смещения	0,411	0,428	0,44
Длина газосборника, м	0,23	0,174	0,343
Длина камеры сгорания, м	0,675	0,764	0,663
Угол наклона оси камеры к оси двигателя, °	5,59	4,94	7,564
Гидравлический расчет			
Коэффициент гидравлических потерь в жаровой трубе	0,6	0,6	0,5
Коэффициент тепловых потерь в КС	0,06	0,066	0,085

Потери давления в камере	0,074	0,043	0,11
Коэффициент восстановления полного давления в КС	0,926	0,957	0,89

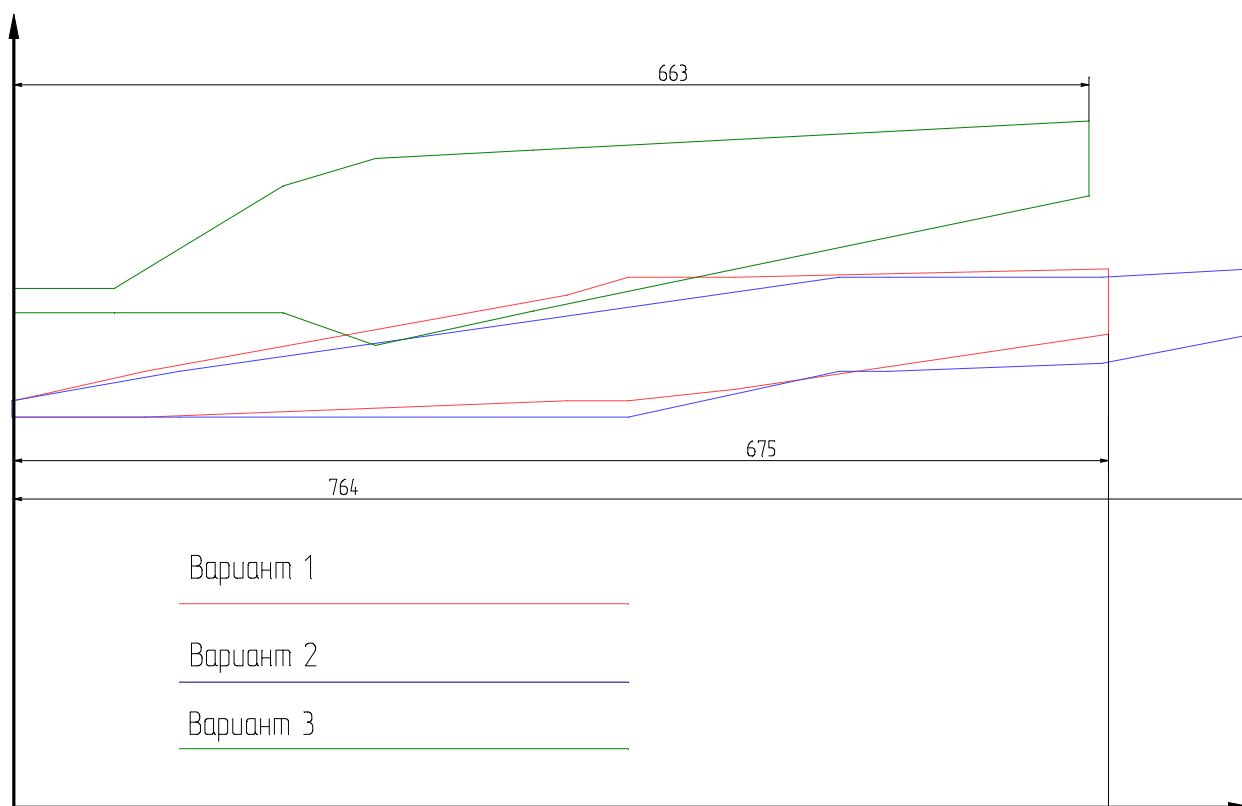


Рисунок 1 – Основные размеры расчетных КС

В результате теоретических расчетов трех вариантов камер сгорания получены геометрические размеры (таблица 1), энергетические и расходные характеристики спроектированных камер сгорания. Все расчетные варианты камер сгорания кольцевого типа имеют температуру горения топлива, близкую к $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом варианты № 1 и № 2 при расходах воздуха 20 кг/с могут применяться в ГТУ мощностью до 14 МВт , а вариант № 3 – в ГТУ мощностью до 37 МВт .

Максимальный коэффициент полезного действия получен в камере сгорания варианта № 2 и составляет $42,39\%$ при минимальном из рассмотренных вариантов расходе топлива ($0,634\text{ кг/с}$). Этот же вариант имеет и наибольшую температуру газов в зоне горения ($1706\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для проведения полного сравнительного анализа и определения наиболее оптимального варианта спроектированных камер сгорания в рамках выполнения научно-исследовательской работы по теме «Проведение теоретических и имитационных экспериментальных исследований, разработка технических решений и моделей, направленных на снижение

вредных выбросов продуктов горения топлива в перспективных ГТУ при высокой температуре сгорания (1700 °С и выше)» авторами был проведен расчет уровня выбросов вредных веществ для каждого из вариантов КС.

Выводы

1. Проектировочные расчеты высокотемпературных кольцевых камер сгорания в первом приближении можно производить с помощью классических методов расчета таких изделий, основанных на уравнениях газовой динамики с использованием некоторых зависимостей и коэффициентов, полученных опытным путем.
2. При проектировании кольцевых камер сгорания, помимо получения геометрических и стехиометрических характеристик объекта, необходимо производить в обязательном порядке оценку вредных выбросов согласно требованиям государственных и международных стандартов.

Указанная выше научно-исследовательская работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта 14.516.11.0040 от 29.03.2013 г.

Список литературы

1. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л., Постников А.М., Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. – Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008. - 620 с. : ил.
2. Крюков В.Г., Наумов В.И., Демин А.В., Абдуллин А.Л., Тринос Т.В. Горение и течение в агрегатах энергоустановок / под ред. акад. РАН Алемасова В.Е. - М. : Янус-К, 1997. - С. 304.
3. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / пер. с англ. – М. : Мир, 1986.
4. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004.
5. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. - М. : Машиностроение, 1973.
6. Резник В.Б., Данильченко В.П., Болотин Н.Б., Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В. Проектный расчет камеры сгорания авиационного ГТД : учеб. пособ. – Куйбышев : КуАИ, 1982. - 84 с.

Рецензенты:

Зайченко Виктор Михайлович, д.т.н., заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва.

Геча Владимир Яковлевич, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» (Российское космическое агентство), г. Москва.